石羊河流域≥10 ℃积温时空变化特征[①]

杨晓玲[1,2]，　丁文魁[1]，　孙占峰[1]，　王鹤龄[2]

（1　甘肃省武威市气象局，甘肃　武威　733099；　2　中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃　兰州　730020）

摘　要： 利用1960—2017年石羊河流域5个气象站逐日平均气温资料，采用滑动平均方法，确定了≥10 ℃积温的界限；通过运用多元线性回归、均方差（σ）、线性趋势系数、累计距平和信噪比等方法，分析了石羊河流域≥10 ℃积温的时空变化特征。结果表明：石羊河流域≥10 ℃积温具有明显地域特征，≥10 ℃积温的均值和极值均为荒漠区高于绿洲平原区，绿洲平原区高于山区，≥10 ℃积温的空间分布与所受天气系统以及经、纬度和海拔高度的关系非常密切。≥10 ℃积温正常年份最多，概率超过65%，依次向两端迅速递减。年、年代≥10 ℃积温呈显著升高趋势。≥10 ℃积温主要在5～9月，7月为高峰值。≥10 ℃积温气候突变全流域、民勤和天祝在1996年，永昌、凉州和古浪在1997年。石羊河流域≥10 ℃积温升高使喜凉作物种植面积缩小，生育期缩短，不利于高产的形成；而使喜温作物种植面积扩大，生育期延长，有利于高产和高品质的形成。本研究将对现代农业结构规划、农作物品种调整以及农业的定量化评估具有重要意义。

关 键 词： ≥10 ℃积温；时空变化；多元线性回归；石羊河流域

文章编号

政府间气候变化委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）第六次评估报告（Sixth Assessment Report，AR6）参阅材料—“IPCC 1.5 ℃特别报告中的安全问题分析”报告指出：在过去115 a中已经升温1 ℃，全球已受到这种变暖影响，以目前的增长速度，到2030年升温将达1.5 ℃，且变暖将持续数百年至数千年；报告还指出气候变暖给人类生存和发展带来了一系列重大影响，已危及到农业、粮食、水资源、能源、生态、公共卫生等方面的安全[1]。

积温是重要的气候资源，也是农作物生长发育指标，对指导农业生产具有重要意义[2-3]。10 ℃是一个地区重要的热量资源，是喜温作物适宜生长的起始温度，也是喜凉作物迅速生长的温度，又是多年生作物开始快速积累干物质的温度。≥10 ℃积温对进行农业气候区划、合理配置种植结构、预报物候期和病虫害发生期有重要作用[4-5]。农业气象学者对≥10 ℃积温多有研究，如分析区域≥10 ℃积温时空变化[6-8]；对比转折年前、后中国≥10 ℃年积温特征[9]；研究≥10 ℃积温对气候变暖响应[10-11]；探讨≥10 ℃积温的预报及其对农业影响[12]，使得≥10 ℃积温的研究得以推进。但目前针对石羊河流域≥10 ℃积温的研究鲜有报道[13-14]，因此，选取1960—2017年石羊河流域5个气象站日平均气温资料，深入探讨了≥10 ℃积温的时空演变特征，揭示了气候变暖背景下石羊河流域热量资源的新格局及其对农业产生的影响，将对现代农业结构规划、农作物品种调整以及农业的定量化评估具有重要意义。

1　研究区概况

石羊河流域是西北干旱区重要的内陆河流域之一。石羊河流域地处青藏高原北坡，南靠祁连山脉，北邻腾格里和巴丹吉林两大沙漠，东接黄土高坡西缘，包括武威市的凉州区、民勤县、古浪县、天祝藏族自治县和金昌市永昌县（图1），总面积4.16×10^4 km^2，地理位置位于101°06′～104°14′ E，37°10′～39°24′ N之间，海拔高度1 300～4 872 m，地形地貌极为复杂，地势南高北低，落差大，其中北部民勤荒

①　**收稿日期：** 2019-06-25；　**修订日期：** 2019-09-30

基金项目： 国家自然基金（41775107，41305134）；甘肃省气象局第八批“十人计划”；武威市科研项目（WW190103）资助

作者简介： 杨晓玲（1971-），女，甘肃省人，理学硕士，高级工程师，研究方向为天气预报及气候变化. E-mail：wwqxj6150343@163.com

漠区,中部凉州为绿洲平原区,北部永昌和南部古浪为浅山区,天祝位于祁连山边坡为高寒山区。石羊河流域风大沙多,辐射强烈,日照充足,昼夜温差大,年平均气温在 0.1 ~8.4 ℃,干旱少雨,年降水量在 113 ~405 mm,年蒸发量在 1 549 ~2 620 mm,≥10 ℃年积温在 755.9 ~3 465.9 ℃,是季风性气候与大陆性气候,高原气候与沙漠气候的交汇处,是较典型的气候过渡带,属于温带干旱、半干旱气候区[15]。

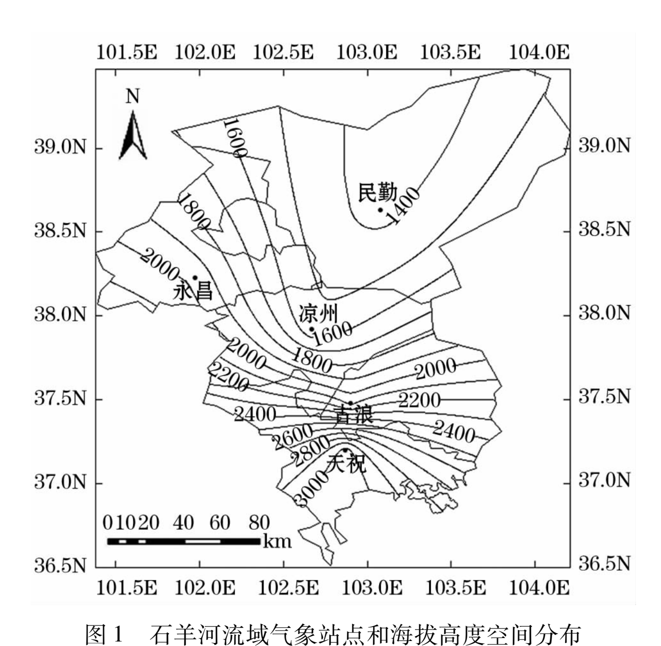


图 1　石羊河流域气象站点和海拔高度空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of meteorological stations and altitude above sea level in Shiyang River Basin

2　资料和方法

2.1　资料来源

资料选取 1960—2017 年河西走廊东部永昌、民勤、凉州、古浪、天祝的乌鞘岭 5 个气象站逐日平均气温。观测数据完整性和连续性较好,时间序列长,可信度高。

2.2　研究方法

2.2.1　≥10 ℃积温的确定　采用 5 d 滑动平均法确定日平均气温稳定≥10 ℃起止日期,起始日定义为 5 d 滑动平均气温≥10 ℃的日期,终止日定义为 5 d 滑动平均气温 < 10 ℃的日期[16]。确定了≥10 ℃界限温度的起止日期,计算年内起止日期间日平均气温≥10 ℃总和为≥10 ℃年积温[17]。全流域年≥10 ℃积温为同一年份不同站点($n=5$)的平均,各地平均≥10 ℃积温为同一站点不同年份的平均($m=58$ a)。

2.2.2　多元线性回归模型　假设某一因变量 y 受 k 个自变量 $x_1,x_2,\cdots,x_k$ 的影响,那么多元线性回归模型为[18-20]:

$$\acute{y}=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_kx_k \tag{1}$$

式中:b_0 为常数;$b_1,b_2,\cdots,b_k$ 为偏回归系数;$\acute{y}$ 为观测值 y 的预测值。观测值 y 是预测值 $\acute{y}$ 与残差 y' 的和,公式为:

$$y=\acute{y}+y' \tag{2}$$

考虑到积温与经度、纬度和海拔的关系密切,建立的多元线性回归模型为:

$$\acute{y}_j=b_0+b_1\theta+b_2\varphi+b_3\lambda \tag{3}$$

式中:θ 为经度;φ 为纬度;λ 为海拔。

2.2.3　均方差判别　$\bar{x}$ 为≥10 ℃积温多年平均值,x_i 为≥10 ℃年积温。运用平均值($\bar{x}$)和均方差(σ)判断指标[21]对 x_i 的异常性进行判别,若 x_i 在 $\bar{x}\pm\sigma$ 之间,为正常年;若 x_i 在 $\bar{x}\pm\sigma$ 和 $\bar{x}\pm2\sigma$ 之间,为偏高或偏低年;若 x_i 在 $\bar{x}\pm2\sigma$ 之外,为特高或特低年。

2.2.4　气候倾向率　利用线性趋势回归分析≥10 ℃年积温的时间变化,计算≥10 ℃积温的气候倾向率,回归方程[22]为:

$$x_i=a+bt_i,\quad i=1,2,3,\cdots,n \tag{4}$$

式中:x_i 同上;用 t_i 为 x_i 所对应的时间;b 为倾向率,$b\times10$ 为每 10 a 的变化率。变化趋势的显著性,采用 t 与 x 间的气候趋势系数进行显著性检验。根据蒙特卡罗模拟方法[23]:通过信度 $\alpha=0.1$、0.05、0.01检验对应的相关系数临界值依次为:0.305 8、0.365 3、0.443 0,当气候趋势系数绝对值大于上述临界值时,分别认为较显著、显著、很显著。

2.2.5　累计距平和信噪比　从累积距平曲线可比较直观地看出变量的上下起伏,并可判断其长期演变趋势及持续变化,还可诊断出发生转折和突变的大致时间,从曲线的小波动可考察其短期的距平变化。采用公式[24]为:

$$c(t)=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x}) \tag{5}$$

式中:$c(t)$ 为≥10 ℃年积温累计距平;$\bar{x}$、x_i 的意义同上。$c(t)$ 绝对值达到最大时,对应的 t 为转折年。为检验转折是否达到气候突变的标准,计算转折年的信噪比,计算公式为:

$$S/N = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_1 + s_2} \tag{6}$$

式中:S/N 为信噪比;$\bar{x}_1$、$\bar{x}_2$ 和 s_1、s_2 分别为转折年前后两个阶段≥10 ℃积温的平均值和标准差。当S/N≥1.0 时,存在气候突变,最大 S/N 对应年定义为气候突变年[25]。

3 结果与分析

3.1 ≥10 ℃积温空间分布

3.1.1 平均及极值空间分布 石羊河流域地处祁连山东麓,境内地形复杂,高山平原沙漠地貌并存,≥10 ℃积温的地域分布存在一定差异。≥10 ℃年积温:全流域 2 443.8 ℃;民勤最高为 3 465.9 ℃;凉州次之为 3 268.5 ℃;再次为古浪,2 366.4 ℃;永昌 2 362.5 ℃;天祝最低为 755.9 ℃,即≥10 ℃年积温荒漠区高于绿洲平原区,绿洲平原区高于山区。≥10 ℃积温最高和最低值与平均值分布一致,民勤最高 4 014.0 ℃(2016 年);天祝最低 403.9 ℃(1976 年)(图 2),各地≥10 ℃积温最高和最低值相差在 632.2 ~ 940.8 ℃。由此可知,≥10 ℃积温南北空间差异较大。

石羊河流域≥10 ℃积温的空间差异与影响当地天气系统关系较大,平原区和荒漠区主要受西北和偏北气流环流背景影响,大气携带水汽相对较少,晴天较多,阴雨天少,气温较高,≥10 ℃积温自然高;山区位于祁连山东北侧,受西南季风影响,暖湿气流活跃,阴雨日数较多,气温较低,≥10 ℃积温低。其次,≥10 ℃积温的空间差异还与所在的地理位置和海拔高度关系密切,由于地面观测站点数量有限,气象站点代表的空间范围有限,因此,在分析≥10 ℃积温的空间差异时,采用多元线性回归模型进行模拟,将各地≥10 ℃积温及经度、纬度和海拔代入公式(3)计算,得出 9 个时段≥10 ℃积温的回归模拟方程及参数(表 1),经统计检验,各时段回归方程均通过了 $\alpha = 0.01$ 置信水平检验,达到回归方程的精度验证。利用回归方程和公式(2)可求出各地不同时段的残差 y'。在已知流域内任一点经度、纬度和海拔的情况下,利用表 1 中的回归模型可得出流域内任一点不同时段≥10 ℃积温的预测值 $\hat{y}$,在同一县区内,由于经度、纬度和海拔的差异不大,残差可用上述求得观测站点的残差 y'代替,然后利用公式(2)求出任一点不同时段≥10 ℃积温,进而可得到研究区≥10 ℃积温的空间分布和动态变化。进一步说明了石羊河流域≥10 ℃积温的空间差异性明显。

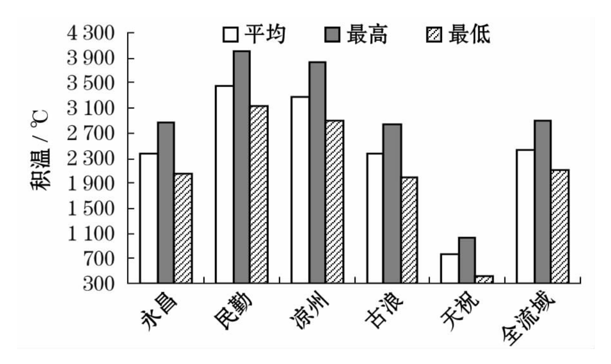


图 2 石羊河流域≥10 ℃积温平均和极值

Fig. 2 Mean and absolute value of ≥10 ℃ accumulated temperature in Shiyang River Basin

3.1.2 异常性空间分布 石羊河流域及各地≥10 ℃积温的异常性相对一致(表 2),正常年最多,在 38 ~ 41 a,概率在 65.5% ~ 70.7%;异常年在 17 ~ 20 a,概率在 29.3% ~ 34.5%,其中,特低 0.0% ~

表 1 石羊河流域不同时段≥10 ℃积温的多元线性回归模型及其参数

Tab. 1 Multiple linear regression models of ≥10 ℃ accumulated temperature of different time periods and its parameter in Shiyang River Basin

时间段	多元回归模型	复相关系数	R^2	置信水平 α
1960—1969 年	$\hat{y} = 7\,767.899 + 39.934\theta - 162.722\varphi - 1.686\lambda$	0.999 6	0.999 2	0.01
1970—1979 年	$\hat{y} = 973.123 + 76.608\theta - 88.431\varphi - 1.627\lambda$	0.999 9	0.999 8	0.01
1980—1989 年	$\hat{y} = 1\,915.765 + 59.313\theta - 62.005\varphi - 1.663\lambda$	0.999 9	0.999 8	0.01
1990—1999 年	$\hat{y} = -4\,294.43 + 109.080\theta - 34.853\varphi - 1.575\lambda$	0.999 9	0.999 8	0.01
2000—2009 年	$\hat{y} = 10\,244.565 + 58.506\theta - 264.001\varphi - 1.833\lambda$	0.999 3	0.998 6	0.01
2010—2017 年	$\hat{y} = 8\,983.123 + 60.365\theta - 229.679\varphi - 1.886\lambda$	0.999 9	0.999 8	0.01
1960—1989 年	$\hat{y} = 3\,552.252 + 58.618\theta - 104.386\varphi - 1.653\lambda$	0.999 9	0.999 8	0.01
1990—2017 年	$\hat{y} = 4\,724.379 + 76.876\theta - 172.626\varphi - 1.756\lambda$	0.999 8	0.999 6	0.01
1960—2017 年	$\hat{y} = 4\,102.308 + 67.540\theta - 137.199\varphi - 1.703\lambda$	0.999 9	0.999 8	0.01

表 2　石羊河流域≥10 ℃积温异常年数 / a

Tab. 2　Abnormal year number of ≥10 ℃ accumulated temperature in Shiyang River Basin / a

类型	永昌	民勤	凉州	古浪	天祝	全流域
特低	0	0	0	0	1	0
偏低	6	6	6	5	10	7
正常	39	41	41	41	38	40
偏高	12	8	9	9	9	9
特高	1	3	2	3	0	2

1.7%，偏低 10.3% ~17.2%，偏高 13.8% ~20.7%，特高 0.0% ~5.2%。由此可知，石羊河流域≥10 ℃积温正常年概率均超过 65%，依次向两端递减，偏低和特低年概率小，在 8.6% ~19.0%，但仍会对农牧业安全生产造成一定的影响。

3.2　≥10 ℃积温时间变化

3.2.1　年代际变化　表 3 为石羊河流域≥10 ℃积温距平，所用均值为 1960—2017 年的平均。全流域及各地≥10 ℃积温年代变化比较一致，20 世纪 60 ~70 年代呈降低趋势，70 年代后呈逐年代升高趋势，但升幅不尽相同。全流域及各地≥10 ℃积温 20 世纪 60 ~90 年代为负距平，≥10 ℃积温偏低，70 年代显著偏低；21 世纪前 18 a 为正距平，≥10 ℃积温偏高，2010—2017 年显著偏高。20 世纪 70 年代至 21 世纪的 2010—2017 年≥10 ℃积温升高幅度全流域 470.2 ℃、永昌 427.2 ℃、民勤 537.3 ℃、凉州 619.6 ℃、古浪 506.0 ℃、天祝 261.2 ℃。由此可知，全流域及各地≥10 ℃积温出现了较大幅度的升高。

表 3　石羊河流域≥10 ℃积温年代距平 / ℃

Tab. 3　Age anomaly of ≥10 ℃ accumulated temperature in Shiyang River Basin / ℃

年代	永昌	民勤	凉州	古浪	天祝	全流域
60 年代	-81.3	-136.8	-83.9	-96.5	-56.7	-91.1
70 年代	-164.6	-196.1	-228.4	-187.4	-107.6	-176.8
80 年代	-73.2	-93.3	-160.6	-122.1	-125.8	-115.0
90 年代	-18.0	-12.0	-118.0	-36.7	43.8	-28.2
00 年代	127.1	165.2	278.0	187.9	123.3	176.3
2010—2017 年	262.6	341.2	391.2	318.6	153.6	293.4

3.2.2　年际变化　石羊河流域≥10 ℃年积温随年份呈升高趋势（图 3），线性回归方程计算≥10 ℃年积温的气候倾向率及趋势系数（表 4），气候倾向率为凉州 > 民勤 > 古浪 > 全流域 > 永昌 > 天祝，即凉州升高趋势最明显。根据蒙特卡罗模拟方法规定，全流域及各地气候趋势系数均通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验，升高趋势很显著。杨晓玲等[26]发现，在全球气候变暖的背景下石羊河流域气温的上升率达 0.406 ℃ · 10 a^{-1}，这可能是流域≥10 ℃年积温升高的直接原因之一。

3.2.3　月际变化　石羊河流域≥10 ℃积温月际变化特征明显（图 4）。各地≥10 ℃积温月变率（最高月与最低月差）较大，≥10 ℃积温主要在 5 ~9 月，集中在 6 ~8 月，7 月为高峰值，依次向两端递减，其中，5 ~9 月占≥10 ℃年积温的 87.8% ~99.3%；6 ~8 月占 59.1% ~89.6%；4 月和 10 月天祝未出现≥10 ℃积温，3 月只有民勤和凉州出现≥10 ℃积

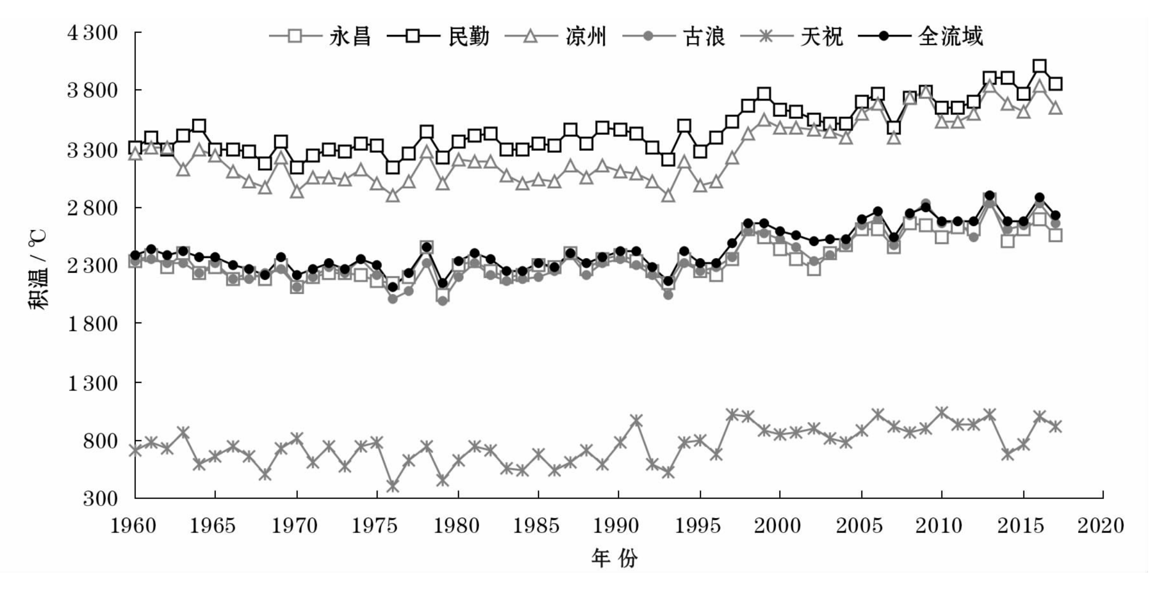


图 3　石羊河流域≥10 ℃积温年变化

Fig. 3　Annual variation of ≥10 ℃ accumulated temperature in Shiyang River Basin

表 4　石羊河流域≥10 ℃积温的气候倾向率和趋势系数

Tab. 4　Climate tendency rates and trend coefficient of ≥10 ℃ accumulated temperature in Shiyang River Basin

指标	永昌	民勤	凉州	古浪	天祝	全流域
倾向率 / ℃ · 10 a^{-1}	74.905	101.19	110.42	92.631	52.433	86.314
趋势系数	0.722 6	0.804 1	0.709 6	0.742 8	0.568 2	0.746 3

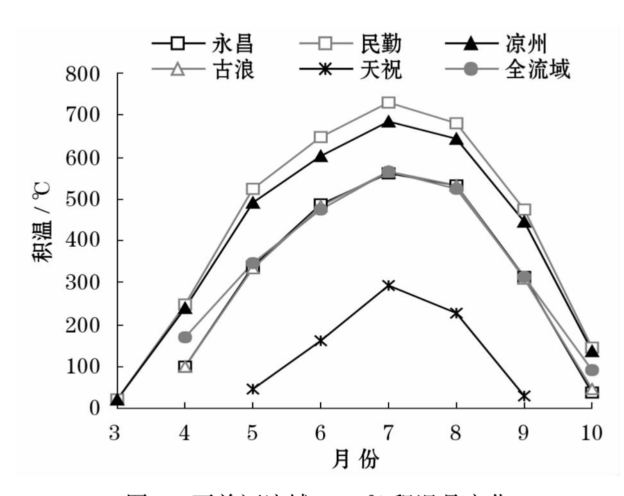


图 4　石羊河流域≥10 ℃积温月变化

Fig. 4　Monthly change of ≥10 ℃ accumulated temperature in Shiyang River Basin

温,1 ~2 月和 11 ~12 月各地均未出现≥10 ℃积温。即石羊河流域≥10 ℃积温出现在夏半年。

表 5 为石羊河流域≥10 ℃积温月极值及出现时间。全流域≥10 ℃积温月最高值 663.1 ℃,出现在 2010 年 7 月,次高值 643.9 ℃,出现在 2016 年 7 月。各地≥10 ℃积温月最高值在 404.2 ~815.0 ℃,均出现在 2010 年 7 月;次高值在 398.4 ~797.3 ℃,也出现在 7 月,出现年份不太一致,永昌和凉州在 2016 年,民勤在 2000 年、古浪和天祝在 2017 年。

3.2.4　突变分析　采用累计距平法对近 58 a 石羊河流域≥10 ℃积温进行气候突变分析。全流域及各地≥10 ℃积温变化比较一致(图 5),20 世纪 60 年代至 90 年代中期呈波动降低趋势,1996 年、1997 年开始呈快速升高趋势,即 90 年代中期至 21 世纪前 18 a 为快速升高阶段,1996 年全流域、民勤、天祝信噪比绝对值最大,分别为 1.7、1.5、1.1,通过了信噪比检验,其中,1960—1996 年平均值分别为 2 319.6 ℃、3 332.1 ℃、672.6 ℃,1997—2017 年平均值分别为 2 662.7 ℃、3 701.7 ℃、902.8 ℃,两个时段相差分别为 343.1 ℃、369.7 ℃、230.2 ℃;1997 年永昌、凉州、古浪信噪比绝对值最大,分别为 1.3、1.9、1.6,通过了信噪比检验,其中,1960—1997年

表 5　石羊河流域≥10 ℃积温月极值及出现时间

Tab. 5　Extreme value of month ≥10 ℃ accumulated temperature and its occurrence time in Shiyang River Basin

指标	永昌	民勤	凉州	古浪	天祝	全区域
最高值 / ℃	652.5	815.0	773.8	669.8	404.2	663.6
出现时间	2010 -07	2010 -07	2010 -07	2010 -07	2010 -07	2010 -07
次高值 / ℃	638.8	797.3	706.1	643.2	398.4	643.9
出现时间	2016 -07	2000 -07	2016 -07	2017 -07	2017 -07	2016 -07

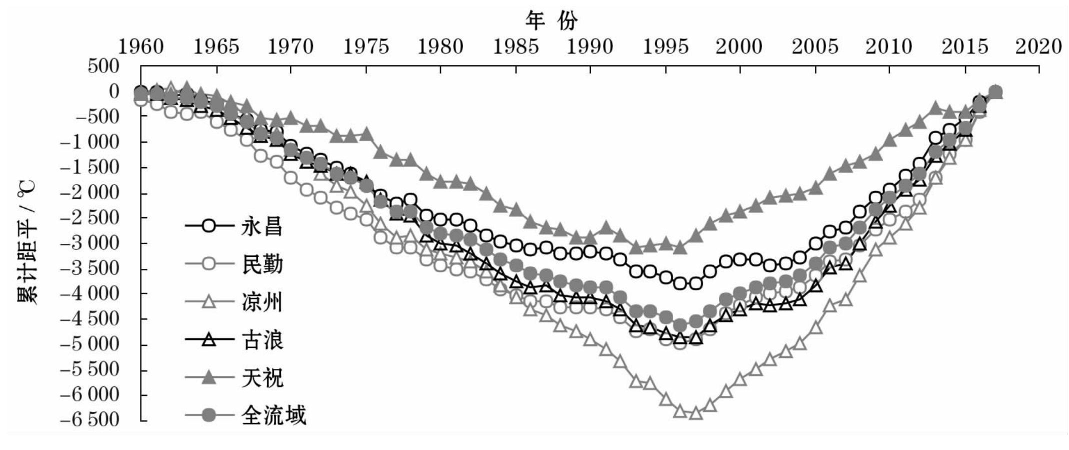


图 5　石羊河流域≥10 ℃积温的累计距平

Fig. 5　Accumulated anomaly of ≥10 ℃ accumulated temperature in Shiyang River Basin

平均值分别为 2 262.4 ℃、3 101.4 ℃、2 238.6 ℃，1998—2017 年平均值分别为 2 552.5 ℃、3 586.1 ℃、2 686.7 ℃，两个时段相差分别为 290.1 ℃、484.7 ℃、448.1 ℃。因此，可认为≥10 ℃积温气候突变全流域、民勤、天祝在 1996 年，永昌、凉州、古浪在 1997 年。

3.3　≥10 ℃积温对农业生产的影响

农业是受气候变化响应最为敏感的行业之一。石羊河流域是气候变化的敏感区和农业生产脆弱区，气候变化对石羊河流域的农作物种植结构、地理分布、生理生态、生长发育及产量等产生了一定影响[27-29]。≥10 ℃积温是重要的农业气候指标，分析发现，石羊河流域≥10 ℃积温升高使流域内喜凉作物春小麦面积减少，喜温作物玉米和棉花面积大幅度增多，作物种植上限高度抬升，种植范围扩大，种植界限向高海拔移动，对农业种植结构产生了明显的影响；≥10 ℃积温升高使农作物生长节奏加快、生育期提前和缩短，加速了生长发育的进程；≥10 ℃积温升高对喜凉作物春小麦高产形成不利，负效应主要在苗期和灌浆期，而对喜温作物玉米和棉花等产量和品质的提高十分有利，特别对生育后期的促进效应较明显。

4　结论与讨论

石羊河流域≥10 ℃积温具有明显地域特征，≥10 ℃积温的均值和极值均为荒漠区高于绿洲平原区，绿洲平原区高于山区，荒漠区民勤最高值达 4 014.0 ℃（2016 年），山区天祝最低值 403.9 ℃（1976 年），≥10 ℃积温的地域分布除与所受的天气系统有关外，还与经度、纬度和海拔高度关系密切，不同时段≥10 ℃积温多元线性回归模型的复相关系数均超过 0.999，置信水平均通过了 $\alpha=0.01$，通过回归模型得到了石羊河流域≥ 10℃积温的空间分布和动态变化。≥10 ℃积温正常年最多，概率超过 65%，依次向两端迅速递减。偏低和特低年概率虽小，但仍会对农牧业生产造成一定的影响。年、年代≥10 ℃积温总体呈升高趋势，凉州升高趋势最明显。≥10 ℃积温主要在 5～9 月，集中在 6～8 月，高峰值在 7 月，依次向两端递减。≥10 ℃积温气候突变全流域、民勤和天祝在 1996 年，永昌、凉州和古浪在 1997 年。

石羊河流域≥10 ℃积温的升高使喜凉作物种植面积缩小，生育期缩短，不利于高产的形成；而使喜温作物种植面积扩大，生育期延长，对提高产量和品质极为有利。

在全球变暖背景下，石羊河流域≥10 ℃积温升高对农业生产的影响有利有弊。一方面，石羊河流域热量资源得以改善，促使作物种植结构调整，有利于作物有机物质积累，加快了生育期，作物的种植界线有向高纬度和高海拔移动的趋势[30]。另一方面，石羊河流域热量资源充足，会使干旱区农作物病虫害繁衍加速、土壤干旱化与盐渍化加剧，暖日发生频率与强度加大，严重影响到作物产量与农业生产的稳定性，加大了农业灾害损失[31]。因此，需趋利避害、合理利用农业气候资源，积极应对气候变暖对农业生产的影响。

参考文献（References）

[1] 中国气象局气象干部培训学院. 气候变化第六次评估参阅材料（二）[M]. 中国气象局图书馆，2018：11.［Training College of Meteorological Cadres of China Meteorological Administration. Reference material for the sixth assessment of climate change（Ⅱ）[M]. Library of China Meteorological Administration，2018：11.］

[2] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报，2015，26（1）：1－11.［GUO Jianping. Research advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorology Science，2015，26（1）：1－11.］

[3] 覃志豪，唐华俊，李文娟，等. 气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展和发展方向[J]. 中国农业资源与区划，2013，34（5）：1－7.［TAN Zhihao，TANG Huajun，LI Wenjuan，et al. Research progress and development direction of the impact of climate change on agriculture and grain production in China[J]. China Agricultural Resources and Regionalization，2013，34（5）：1－7.］

[4] 刘德祥，董安祥，邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业的影响[J]. 自然资源学报，2005，20（1）：119－125.［LIU Dexiang，DONG Anxiang，DENG Zhenyong. Impact of climate warming on agriculture in northwest China[J]. Journal of Natural Resources，2005，20（1）：119－125.］

[5] 孙杨，张雪芹，郑度. 气候变暖对西北干旱区农业气候资源的影响[J]. 自然资源学报，2010，25（7）：1153－1162.［SUN Yang，ZHANG Xueqin，ZHENG Du. The impact of climate warming on agricultural climate resources in the arid region of northwest China[J]. Journal of Natural Resources，2010，25（7）：1153－1162.］

[6] 孟艳灵，殷淑燕，杨锋，等. 晋陕蒙地区≥10 ℃积温的时空变化特征[J]. 中国农业气象，2016，37（6）：615－622.［MENG Yanling，YIN Shuyan，YANG Feng，et al. Spatial and temporal distribution of accumulated temperature above 10 ℃ in Shanxi-Shaanxi-In-

ner Mongolia region[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016,37(6):615 – 622.]

[7] 朱红蕊,尹嫦姣,张洪玲,等.黑龙江省≥10 ℃积温时空变化特征[J].冰川冻土,2015,37(6):1473 – 1479.[ZHU Hongrui, YIN Changjiao, ZHANG Hongling, et al. The spatial-temporal change of active accumulated temperature of ≥10 ℃ in Heilongjiang Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6):1473 – 1479.]

[8] 戴声佩,李海亮,罗红霞,等.1960—2011 年华南地区界限温度 10 ℃积温时空变化分析[J].地理学报,2014,69(5):650 – 660.[DAI Shengpei, LI Hailiang, LUO Hongxia, et al. The spatio-temporal change of active accumulated temperature ≥10 ℃ in southern China from 1960 to 2011[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(5):650 – 660.]

[9] 柏秦凤,霍治国,李世奎,等.1978 年前、后中国≥10 ℃年积温对比[J].应用生态学报,2008,19(8):1810 – 1816.[BAI Qinfeng, HUO Zhiguo, LI Shikui, et al. Comparison of accumulated temperature above 10 ℃ before and after the year 1978 in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(8):1810 – 1816.]

[10] 张厚瑄,张翼.中国活动积温对气候变暖的响应[J].地理学报,1994,49(1):27 – 35.[ZHANG Houxuan, ZHANG Yi. Response of active accumulated temperature to climate warming in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1994, 49(1):27 – 35.]

[11] 安娟,杜志国,杨晓波,等.气候变暖背景下辽阳市≥10 ℃活动积温变化特征剖析[J].现代农业科技,2014,(23):274 – 275.[AN Juan, DU Zhiguo, YANG Xiaobo, et al. Analysis of change characteristics of active accumulated temperature ≥10 ℃ under background of climate warming in Liaoyang City[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014,(23):274 – 275.]

[12] 霍金兰,张旭辉,施英,等.江苏省近 50 a10 ℃、15 ℃积温变化及其对农业的影响[C]//第十届长三角气象科技论坛论文集,2013:1 – 7.[HUO Jinlan, ZHANG Xuhui, SHI Ying, et al. Accumulated temperature change of 10 ℃ and 15 ℃ and its impact on agriculture in Jiangsu Province in recent 50 years[C]//Papers Collection of the 10th Yangtze River Delta Meteorological Science and Technology Forum, 2013:1 – 7.]

[13] 兰晓波,方锋,杨晓玲,等.河西走廊东部近 52 a 热量资源变化特征[J].安徽农业科学,2012,40(33):16272 – 16274,16349.[LAN Xiaobo, FANG Feng, YANG Xiaoling, et al. Variation characteristics of thermal resources in east Hexi Corridor in recent 50 years[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(33):16272 – 16274,16349.]

[14] 杨永龙,王润元,刘明春,等.高海拔山区油菜生育期对积温的响应及其在区划中的应用[J].江苏农业科学,2012,40(5):55 – 58.[YANG Yonglong, WANG Runyuan, LIU Mingchun, et al. Response of rapeseed growth period to accumulated temperature in high altitude mountainous areas and its application in high altitude mountainous areas[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(5):55 – 58.]

[15] 白肇烨,徐国昌,孙学筠,等.中国西北天气[M].北京:气象出版社,1991:258 – 357.[BAI Zhaoye, XU Guochang, SUN Xuejun, et al. Weather over northwest China[M]. Beijing: Meteorological Press, 1991:258 – 357.]

[16] 张雪芹,孙杨,郑度,等.中国干旱区温度带界线对气候变暖的响应[J].地理学报,2011,66(9):1166 – 1178.[ZHANG Xueqin, SUN Yang, ZHENG Du, et al. Responses of temperature zone boundaries in the arid region of China to climatic warming [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9):1166 – 1178.]

[17] 曲曼丽.农业气候实习指导[M].北京:北京农业大学出版社,1991.[QU Manli. Practical guidance to agricultural climatology [M]. Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1991.]

[18] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].2 版.北京:高等教育出版社,2002.[XU Jianhua. Mathematical methods in contemporary geography[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002.]

[19] 于贵瑞,何洪林,刘新安,等.中国陆地生态信息空间化技术研究(Ⅰ)–气象/气候信息的空间化技术途径[J].自然资源学报,2004,19(4):537 – 544.[YU Guirui, HE Honglin, LIU Xin'an, et al. Study on spatialization technology of terrestrial eco-information in China(Ⅰ): The approach of spatialization in meteorology/climate information[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(4):537 – 544.]

[20] 刘新安,于贵瑞,范辽生,等.中国陆地生态信息空间化技术研究(Ⅲ)–温度、降水等气候要素[J].自然资源学报,2004,19(6):818 – 825.[LIU Xin'an, YU Guirui, FAN Liaosheng, et al. Study on spatialization technology of terrestrial eco-information in China(Ⅲ): Temperature and precipitation[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(6):818 – 825.]

[21] 邹京发.运用平均值和均方差判断指标的异常波动[J].冶金动力,1981,(1):55 – 56.[ZOU Jingfa. Abnormal fluctuation by using mean value and mean square deviation[J]. Metallurgical Power, 1981,(1):55 – 56.]

[22] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].第 2 版.北京:气象出版社,2007.[WEI Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 2007.]

[23] LIVEZEY R E, CHEN W Y. Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques[J]. Monthly Weather Review, 1983, 111(1):46 – 59.

[24] 杜军,李春,廖健,等.近 45 a 拉萨浅层地温对气候变化的响应[J].气象,2007,33(10):61 – 67.[DU Jun, LI Chun, LIAO Jian, et al. Respones of climatic change on soil temperature at shallow layers in Lhasa from 1961 to 2005[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(10):61 – 67.]

[25] 黄嘉佑.气候状态变化趋势与突变分析[J].气象,1995,21(7):54 – 57.[HUANG Jiayou. Climate change trend and mutation analysis[J]. Meteorological Monthly, 1995, 21(7):54 – 57.]

[26] 杨晓玲,丁文魁,刘明春,等.河西走廊东部近 50 a 气温变化特征及其对比分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(8):76 –

81.［YANG Xiaoling,DING Wenkui,LIU Mingchun,et al. Change characteristics of temperature in eastern Hexi Corridor in recent 50 years［J］. Journal of Arid Land Resources and Environment,2011,25(8):76－81.］

［27］刘明春,张强,邓振镛,等. 气候变化对石羊河流域农业生产的影响［J］. 地理科学,2009,29(5):727－732.［LIU Mingchun,ZHANG Qiang,DENG Zhenyong,et al. Impacts of climate change on agricultural production in Shiyang River Basin［J］. Scientia Geographica Sinica,2009,29(5):727－732.］

［28］王润元,张强,王耀林,等. 西北干旱区玉米对气候变暖的响应［J］. 植物学报,2004,46(12):1387－1392.［WANG Runyuan,ZHANG Qiang,WANG Yaolin,et al. Response of corn to climate warming in arid areas in northwest China［J］. Acta Botanica Sinica,2004,46(12):1387－1392.］

［29］孙杨. 西北干旱区气候变化对农业生产的影响［D］. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2010.［SUN Yang. Climate change and its impact on the agricultural production in the arid region of northwest China［D］. Beijing:Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,CAS,2010.］

［30］云雅如,方修琦,王丽岩,等. 我国作物种植界线对气候变暖的适应性响应［J］. 作物杂志,2007,23(3):20－23.［YUN Yaru,FANG Xiuqi,WANG Liyan,et al. China's crop planting line adaptive response to climate warming［J］. Crops,2007,23(3):20－23.］

［31］张强,邓振镛,赵映东,等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响［J］. 生态学报,2008,28(3):1210－1218.［ZHANG Qiang,DENG Zhenyong,ZHAO Yingdong,et al. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China［J］. Acta Ecologica Sinica,2008,28(3):1210－1218.］

Spatial and temporal change characteristics of ≥10 ℃ accumulated temperature in Shiyang River Basin

YANG Xiao-ling[1,2], DING Wen-ku[1], SUN Zhan-feng[1], WANG He-ling[2]

(1 *Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province*, *Wuwei* 733099, *Gansu*, *China*;
2 *Lanzhou Institute of Arid Meteorology CMA*, *Lanzhou* 730020, *Gansu China*)

Abstract: Accumulated temperature is an important climate resource and crop growth and development index. In this paper, using daily average temperatures of five meteorological stations in Shiyang River basin, Gansu Province, China during 1960－2017, a cumulative temperature limit of ≥10 ℃ was determined using the sliding average method. Spatiotemporal changes in cumulative temperature ≥10 ℃ were analyzed via multiple linear regression, mean square deviation (σ), linear trend coefficient, cumulative anomaly, and signal-to-noise ratio methods. The results showed that the cumulative temperature ≥10 ℃ of Shiyang River basin has obvious regional characteristics. In the desert area, the average and extreme values of cumulative temperature of ≥10 ℃ were higher than those in the oasis plain, and the temperature in the oasis plain was higher than that in the mountainous area. The regional distribution of cumulative temperature ≥10 ℃ was closely related to the weather system, longitude, latitude, and altitude. In normal years, a cumulative temperature ≥10 ℃ was the most common, the probability of which exceeded 65%, which was the ends of decline. Annual and decadal cumulative temperatures ≥10 ℃ showed a significant upward trend. The cumulative temperature ≥10 ℃ mainly occurs from May to September, with the highest peak in July. Abrupt changes in cumulative temperature ≥10 ℃ occurred in the entire basin, including Minqin and Tianzhu in 1996, and Liangzhou, Yongchang, and Gulang in 1997. When the cumulative temperature in the Shiyang River basin exceeds ≥10 ℃, the planting zones decrease and the growth period becomes shorter, which is not favorable for the high yields of cool-weather crops, while it is favorable for the warm-weather crops. This paper revealed new pattern of heat resources and its impacts on agriculture in Shiyang River basin. This is very important for modern agricultural planning, crop variety adjustment, and agricultural quantitative evaluation.

Key words: ≥10 ℃ accumulated temperature; Spatio-temporal change; Mltiple linear regression; Shiyang River Basin